

FOTOTRIANGULAÇÃO COM PARÂMETROS ADICIONAIS PARA CÂMARAS DIGITAIS: UMA AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

Bundle Block Adjustment with additional parameters for digital camera: an experimental assessment

ROBERTO DA SILVA RUY ^{2,3}
ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI ¹
MAURICIO GALO ¹
JULIO KIYOSHI HASEGAWA ¹
RICARDO CESAR MENOSSE ³

Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Ciências e Tecnologia
¹Departamento de Cartografia

²Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
Rua Roberto Simonsen 305 CEP 19060-900 Presidente Prudente, SP, Brasil

³Engemap Engenharia Mapeamento e Aerolevantamento Ltda.

Rua Santos Dumont, 160 CEP 19806-060 Assis, SP, Brasil.

rruy@pos.prudente.unesp.br, roberto@engemap.com.br

{tomaseli, galo, hasegawa}@fct.unesp.br

ricardo@engemap.com.br

RESUMO

Tendo em vista o crescente uso de câmaras digitais em projetos fotogramétricos, especialmente em levantamentos aéreos, o presente trabalho apresenta testes e análises de fototriangulação com parâmetros adicionais, usando diferentes modelos matemáticos, com blocos de imagens coletadas pelo sistema digital SAAPI (Sistema Aerotransportado de Aquisição e Pós-Processamento de Imagens digitais). Foram utilizados três blocos de imagens aéreas, os quais foram processados no software LPS (*Leica Photogrammetry suite*), que dispõe de cinco modelos com grupos de parâmetros adicionais: Bauer, Jacobsen, Ebner, Brown e modelo de lentes. Estes modelos com parâmetros adicionais foram utilizados no ajustamento em bloco por feixes de raios, sendo os resultados analisados no que se refere à acurácia em pontos de verificação e ao comportamento dos parâmetros adicionais. Verificou-se que o

modelo de distorção das lentes foi o que permitiu melhores resultados nos casos estudados.

Palavras chave: Câmaras digitais; fototriangulação com parâmetros adicionais.

ABSTRACT

Considering the growing use of digital cameras in Photogrammetric projects, especially in aerial survey, this paper presents tests and analyses of bundle block adjustment with additional parameters, using different mathematical models, and blocks of images acquired by the SAAPI digital acquisition system. Three blocks of images were processed by the LPS (Leica Photogrammetry Suite) software, in which five groups of additional parameters (AP) can be used: Bauer, Jacobsen, Ebner, Brown and Lens distortion. These AP's models were employed in the bundle block adjustment, and the results were analyzed based on the accuracy of the checking points and on the changes in these additional parameters. The obtained results showed that the Lens Distortion model allowed the best results.

Key words: Digital cameras; bundle block adjustment with additional parameters.

1. INTRODUÇÃO

Uma alternativa cada vez mais considerada nas atividades de aerolevantamento é a utilização de câmaras digitais profissionais de pequeno e médio formato, devido às suas vantagens em termos de custo, portabilidade e processamento, quando comparadas aos sistemas de aquisição de imagens digitais de alto desempenho disponíveis comercialmente. Aliado a isto, a grande disponibilidade no mercado torna estas categorias de câmara altamente atrativas. Em outros países, como no Canadá e nos EUA, estas câmaras estão sendo rotineiramente utilizadas, existindo normas específicas para o uso e calibração destes sensores (ILMB, 2007).

Os sistemas de aquisição de imagem baseados em câmaras de pequeno e médio formato são leves e de maior portabilidade, podendo ser instalados em aeronaves de pequeno porte, e de baixo custo (quando comparados aos sistemas comerciais de aquisição de grande formato). Essa portabilidade, associada à tecnologia digital, agrega algumas vantagens, tais como: acesso rápido e direto aos dados digitais, a reutilização da mídia de gravação e o controle da qualidade da imagem durante o voo, além de alta qualidade radiométrica e espacial proporcionada pelos modernos sensores.

Uma das restrições no uso destes modelos de câmaras por uma parcela da comunidade Fotogramétrica se refere à confiabilidade da geometria interna das câmaras e, conseqüentemente, dos produtos gerados, além do menor rendimento em termos de área imageada por cena. Contudo, estudos realizados nos últimos anos a partir de imagens coletadas por modelos de câmaras profissionais de pequeno e médio formato têm demonstrado a estabilidade dos parâmetros de orientação interior e a qualidade métrica e radiométrica das imagens e dos produtos cartográficos derivados (WACKROW et al., 2007; RUY et al., 2007; HABIB et al., 2004; CRAMER, 2004; HABIB e MORGAN, 2003).

Mesmo considerando estes sistemas estáveis, pode-se recorrer a modelos de fototriangulação com parâmetros adicionais para melhorar a acurácia na reconstrução 3D, uma vez que estes parâmetros adicionais absorvem efeitos sistemáticos residuais presentes no processo de formação da imagem, que normalmente afetam mais a componente altimétrica. Vale ressaltar que os modelos que incorporam parâmetros adicionais (denominados por alguns autores de modelos de autocalibração) são também aplicados nos considerados sistemas digitais de grande formato e de última geração, conforme apresentam Kornus et al (2006) e Gruber e Ladstadter (2006). Os testes apresentados nestes trabalhos foram realizados com o modelo de Ebner, que foi desenvolvido na década de 70 para câmaras que usam filme.

Por estas razões, entende-se que é relevante estudar experimentalmente os diferentes modelos de parâmetros adicionais para câmaras digitais de médio formato. O presente trabalho apresenta uma análise dos resultados obtidos com cinco grupos diferentes de parâmetros adicionais, disponíveis no software LPS (*Leica Photogrammetry Suite*), de forma a avaliar o modelo mais adequado para câmaras digitais. Foram utilizados três blocos de imagens aéreas digitais coletadas com a câmara Hasselblad H1D (22 Megapixels), que integra o sistema SAAPI (Sistema Aerotransportado de Aquisição e Pós-processamento de Imagens digitais) da empresa Engemap.

2. SISTEMA SAAPI

O SAAPI é um sistema desenvolvido pela empresa Engemap Engenharia, Mapeamento e Aerolevantamento Ltda. em parceria com o Departamento de Cartografia da UNESP, com apoio da FAPESP por meio de um projeto PIPE (Processo: 04/09217-3). Trata-se de um sistema formado por câmaras digitais, sensores de georreferenciamento direto e unidade de controle e alimentação de energia, além de módulos de hardware e software.

A plataforma de coleta de imagens pode ser formada por duas câmaras digitais Hasselblad em configuração dual convergente ou apenas uma disposta em modo nadiral. Até Novembro de 2007 estas câmaras dispunham de resolução de 22 megapixels e, após esta data, foram atualizadas para 39 megapixels de resolução. Uma câmara digital com filtro para a captura de imagens infravermelhas na posição nadir pode também ser integrada à plataforma de coleta, para aplicações ambientais.

As câmaras digitais Hasselblad são modelos profissionais com lentes Hasselblad de alta qualidade geométrica e *back* digital Imacon com CCD fixo. Estas características, garantidas pelos fabricantes, possibilitam a confiabilidade no uso destas câmaras em trabalhos fotogramétricos. Outros sistemas comerciais reconhecidos internacionalmente, como é o caso do sistema DigiCAM da empresa IGI (DIGICAM, 2008), utilizam estruturas e componentes similares, tendo sido desenvolvidos também para trabalhos em Fotogrametria.

O sistema de aquisição SAAPI contém um suporte metálico rígido com exoesqueletos individuais para as câmaras, especialmente desenvolvidos para

garantir a geometria e estabilidade das orientações internas das câmaras, bem como da orientação relativa entre elas na plataforma de coleta, conforme mostra a Figura 1. Mais detalhes sobre o sistema podem ser obtidos em Ruy et al (2007).

Figura 1 - Plataforma de coleta de imagens do sistema SAAPI.



A unidade de controle do sistema SAAPI é formada por computador e módulos de hardware e software, que são responsáveis pelo acionamento simultâneo das câmaras e pela sincronização precisa entre o momento de coleta das imagens e os dados de georreferenciamento direto, utilizando a referência de tempo do GPS. As imagens são armazenadas em discos rígidos específicos da Hasselblad.

Para os blocos de imagens utilizados neste trabalho o sistema de georreferenciamento direto ainda se encontrava em fase de integração no sistema, e não foi utilizado neste estudo.

3. FOTOTRIANGULAÇÃO COM PARÂMETROS ADICIONAIS

Em geral, a calibração das câmaras é realizada antes de sua utilização nas coberturas aéreas. Os parâmetros de orientação interior podem ser determinados tanto por métodos de laboratório quanto por métodos de campo, e então fixados durante o processo de fototriangulação. Com isto, assume-se que as coordenadas de pontos medidos nas imagens foram corrigidas dos efeitos sistemáticos (distorções das lentes e deformações do sensor) antes da realização da fototriangulação. Isto permite o uso de um modelo mais simplificado no ajustamento em bloco por feixes de raios, com um número menor de incógnitas e sem parâmetros altamente correlacionados.

Opcionalmente, os parâmetros de orientação interior da câmara (distância focal, coordenadas do ponto principal e parâmetros de distorção das lentes) podem ser determinados como parte da solução durante o ajustamento em bloco, introduzindo parâmetros adicionais às equações de colinearidade e considerando esses parâmetros como incógnitas. Embora a inclusão de parâmetros adicionais

possa resultar em correlações indesejáveis, é relevante considerar que o ambiente em que a calibração foi realizada (laboratório ou outros) é diferente do ambiente de coleta das imagens. Além disto, a operação com as câmaras durante a coleta de imagens e o período de tempo decorrido desde a calibração da câmara podem alterar os parâmetros de orientação interior, dependendo da estabilidade do sistema óptico e da câmara, afetando a reconstrução tridimensional precisa dos pontos.

A terminologia utilizada neste trabalho (Fototriangulação com parâmetros adicionais) é aquela adotada pelos autores dos modelos, sendo relevante destacar que é possível encontrar na literatura diferenças em alguns termos. Por esta razão serão apresentados na sequência os conceitos de fototriangulação por feixes de raios, calibração, autocalibração e calibração em serviço, para evitar possíveis conflitos entre as terminologias, sendo sugeridas as seguintes referências (ANDRADE e OLIVAS, 1981; LUGNANI, 1987; FRYER, 1996 e MIKHAIL et al, 2001, CLARKE e FRYER, 1998):

- *Fototriangulação por feixes de raios*: processo pelo qual se determinam indiretamente a posição e orientação dos feixes de raios das imagens (orientação externa ou exterior) bem como suas precisões, por meio de um ajuste em bloco, a partir de informações de controle. São utilizadas as equações de colinearidade como modelo matemático;
- *Calibração*: procedimento destinado à determinação dos parâmetros de orientação interior, denominados também parâmetros intrínsecos, das câmaras. Este procedimento pode ser tanto realizado em laboratório quanto em um campo de testes com coordenadas de pontos de apoio conhecidas com precisão;
- *Calibração em serviço (on-the-job)*: trata-se de um ajuste por feixes de raios com parâmetros adicionais que podem incorporar as distorções das lentes, distância focal, deslocamento do ponto principal e deformações do sensor. Os pontos de controle são posicionados nas imediações da área a ser imageada. Este método é mais comum no contexto da calibração terrestre, mas é também aplicado na calibração aérea usando campos de testes;
- *Autocalibração (self-calibration)*: este método é em muitos casos confundido com a calibração em serviço. Contudo, na autocalibração não há a necessidade de uso de pontos de controle, sendo usadas como informações externas apenas aquelas destinadas à definição do referencial. O arranjo geométrico das imagens, o número e a distribuição dos pontos observados nas imagens são os fatores que influenciam a acurácia da solução final. A autocalibração não é usualmente aplicada em levantamentos aéreos devido à dificuldade em se obter imagens em diferentes ângulos de vista.

Na solução da calibração, normalmente são considerados modelos polinomiais para incorporar os parâmetros adicionais, sendo que a distância focal e as coordenadas do ponto principal são fixadas a partir dos valores pré-calibrados, como é o caso dos modelos analisados neste trabalho, definidos no final desta seção. Estes modelos são denominados por alguns autores como *modelos de autocalibração* (MIKHAIL et al, 2001; WOLF e DEWITT, 2000), contudo se

tratam de polinômios que visam absorver os efeitos de distorção das lentes e outros erros sistemáticos.

No caso aéreo, devido às correlações entre parâmetros, não é possível estimar simultaneamente os valores da distância focal e das coordenadas do ponto principal no processo, conforme mostram Andrade e Olivas (1981). Estas correlações podem ser reduzidas se houver uma variação significativa da altitude dos pontos no espaço objeto, se forem utilizadas fotografias convergentes e faixas de vôos cruzadas ou, ainda, com o uso de sensores de georreferenciamento direto para a determinação acurada das posições do centro perspectivo da câmara (WOLF e DEWITT, 2000).

Segundo Clarke e Fryer (1998), com os desenvolvimentos e usos de técnicas de ajuste em bloco por D. C. Brown, desde a década de 60, mais comumente com fotografias terrestres, verificou-se que era possível determinar parâmetros de calibração simultaneamente à determinação de coordenadas de alvos no espaço objeto. Este método tornou-se conhecido como autocalibração, que se constitui num método robusto, no qual as observações de pontos nas imagens, adquiridas em diferentes pontos de vista, contribuem para a determinação dos parâmetros de orientação interior e outros efeitos sistemáticos. Os primeiros trabalhos com imagens aéreas surgiram no início da década de 70, e no congresso de 1976 da Sociedade Internacional de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (ISPRS) foi estabelecido um grupo de trabalho que fomentou o estudo de diferentes conjuntos de parâmetros adicionais.

A partir destes estudos, Brown (1972) *apud* Clarke e Fryer (1998) verificou experimentalmente que há correlações relevantes entre certos parâmetros de calibração e parâmetros de orientação exterior (ver ANDRADE e OLIVAS, 1981). Fraser (1982) *apud* Clarke e Fryer (1998) demonstrou que o uso excessivo de parâmetros adicionais pode prejudicar a solução final do ajustamento, efeito este chamado de “superparametrização”.

Conforme já discutido, estes modelos se baseiam em polinômios cujos coeficientes modelam os efeitos de distorção das lentes e demais erros sistemáticos provenientes do processo de aquisição e digitalização das imagens, como erros de deformação do filme, distorção de afinidade e outros erros residuais, como a parte não modelada da refração fotogramétrica.

Neste trabalho, os modelos de Bauer, Jacobsen, Ebner e Brown, além do modelo explícito de lentes, são apresentados e estudados experimentalmente. Vale mencionar que há variações destes modelos na literatura, mas serão apresentados aqueles implementadas no software LPS, que foi utilizado nos testes apresentados neste trabalho (LEICA PHOTOGRAMMETRY SUITE PROJECT MANAGER, 2006; MURAI et al, 1984), ou seja:

Bauer: modelo formado por três parâmetros, resultante de pesquisas realizadas pelo Dr. H. Bauer. O primeiro parâmetro é responsável pela estimação do coeficiente de primeira ordem da distorção radial simétrica. Os outros dois parâmetros definem a deformação afim (não-ortogonalidade e diferença de escala entre os eixos do sistema de coordenadas de imagem - x, y).

$$\begin{aligned}\Delta x &= a_1 x (r^2 - r_0^2) + a_2 x \\ \Delta y &= a_1 y (r^2 - r_0^2) - a_2 y + a_3 x\end{aligned}\quad (1)$$

nos quais (x, y) são as fotocoordenadas, r^2 e r_0^2 as distâncias radiais e (a_1, a_2, a_3) os coeficientes do polinômio de Bauer.

Jacobsen: desenvolvido por K. Jacobsen, o modelo é definido por quatro parâmetros, que correspondem aos coeficientes de primeira e segunda ordem que compensam a deformação afim e o parâmetro que modela a distorção radial simétrica. O parâmetro a_4 visa modelar uma deformação de segunda ordem do plano da imagem, fundamentalmente pertinente às câmaras de filme, e que tem pouco sentido no caso de câmaras digitais, uma vez que o sensor digital é plano.

$$\begin{aligned}\Delta x &= a_1 x (r^2 - r_0^2) + a_2 x + a_3 y \\ \Delta y &= a_1 y (r^2 - r_0^2) - a_2 y + a_3 x + a_4 x^2\end{aligned}\quad (2)$$

sendo (a_1, \dots, a_4) os parâmetros do polinômio de Jacobsen.

Ebner: composto por doze parâmetros, desenvolvido por H. Ebner. Estes parâmetros, implícitos em um polinômio, compensam os vários tipos de erros sistemáticos, correspondentes à distorção das lentes, erros de scanner, deformação afim e deformação do filme.

$$\begin{aligned}\Delta x &= a_1 x + a_2 y - a_3 \left(2x^2 - \frac{4r^2}{3} \right) + a_4 xy + a_5 \left(y^2 - \frac{2r^2}{3} \right) + a_7 x \left(y^2 - \frac{2r^2}{3} \right) + \\ &\quad + a_9 y \left(x^2 - \frac{2r^2}{3} \right) + a_{11} \left(x^2 - \frac{2r^2}{3} \right) \left(y^2 - \frac{2r^2}{3} \right) \\ \Delta y &= -a_1 y + a_2 x + a_3 xy - a_4 \left(2y^2 - \frac{4r^2}{3} \right) + a_6 \left(x^2 - \frac{2r^2}{3} \right) + a_8 y \left(x^2 - \frac{2r^2}{3} \right) + \\ &\quad + a_{10} x \left(y^2 - \frac{2r^2}{3} \right) + a_{12} \left(x^2 - \frac{2r^2}{3} \right) \left(y^2 - \frac{2r^2}{3} \right)\end{aligned}\quad (3)$$

sendo (a_1, \dots, a_{12}) os parâmetros do polinômio de Ebner.

Brown: modelo composto por catorze parâmetros, desenvolvido pelo Dr. D. C. Brown. Os parâmetros são selecionados de acordo com as possíveis origens dos erros físicos, como a deformação e não planaridade do filme, que são modelados por um polinômio de segunda ordem, a distorção das lentes, entre outros.

$$\begin{aligned}
\Delta x = & a_1x + a_2y + a_3xy + a_4y^2 + a_5x^2y + a_6xy^2 + a_7x^2y^2 + \\
& + a_{13}\frac{x}{f}x^2y^2 + a_{14}x(x^2 + y^2) \\
\Delta y = & a_8xy + a_9x^2 + a_{10}x^2y + a_{11}xy^2 + a_{12}x^2y^2 + \\
& + a_{13}\frac{y}{f}x^2y^2 + a_{14}y(x^2 + y^2)
\end{aligned} \tag{4}$$

sendo (a_1, \dots, a_{14}) os parâmetros do polinômio de Brown.

Lens Distortion: o modelo de distorção das lentes, composto por dois parâmetros, foi projetado para autocalibrar os parâmetros de distorção das lentes.

$$\begin{aligned}
\Delta x = & k_1xr^2 + k_2xr^4 \\
\Delta y = & k_1yr^2 + k_2yr^4
\end{aligned} \tag{5}$$

nos quais (k_1, k_2) são os parâmetros de distorção das lentes. Apesar de utilizada a terminologia considerada pelo aplicativo mencionado, este modelo se refere à distorção radial simétrica, onde o parâmetro k_3 é considerado como sendo nulo.

4. BLOCOS DE IMAGENS UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS

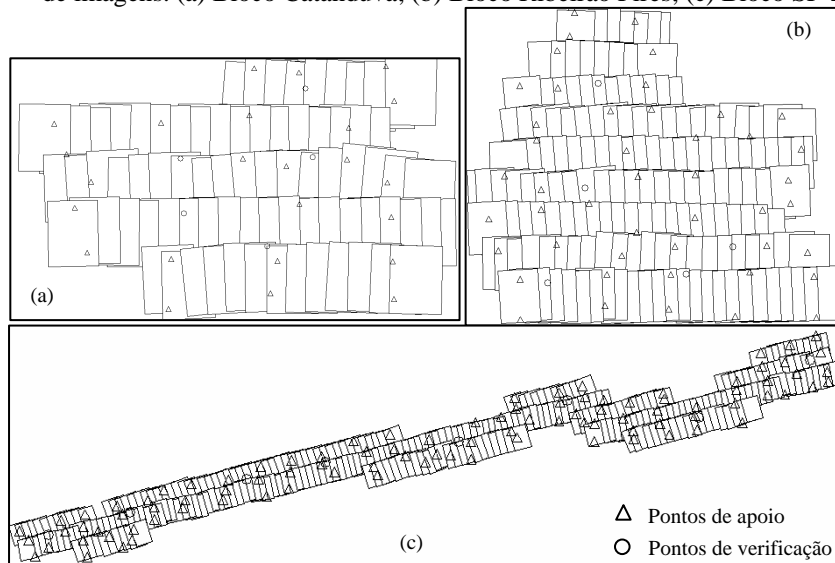
No presente trabalho foram realizados testes de fototriangulação usando três blocos de imagens adquiridos no ano de 2007 pela câmara digital Hasselblad (22 megapixels) do sistema SAAPÍ. Nestas coletas, o sistema SAAPÍ foi configurado com uma câmara Hasselblad na posição nadir. A Tabela 1 apresenta as informações básicas de cada um dos blocos de imagens utilizados nos testes, assim como a Figura 2 mostra a distribuição das imagens e dos pontos de apoio e verificação.

Tabela 1- Informações dos blocos de imagens.

BLOCO	Catanduva	SP-270	Ribeirão Pires
Data do voo	05/06/07	04/07/07	20/07/07
Número de imagens	76	299	160
Número de faixas	5	4	9
Aerobase (m)	865,9	432,9	432,9
Altura de voo (m)	2220	1110	1110
Base/Altura	0,29	0,29	0,29
Escala da imagem	1/45000	1/22000	1/22000
GSD (m)*	0,40	0,20	0,20
Superposição (%)	60	60	60
Número de pontos de apoio	24	96	46
Número de pontos de verificação	5	8	5

* GSD (Ground Sample Distance – Elemento de Resolução no Terreno).

Figura 2 - Distribuição das imagens e dos pontos de apoio e verificação nos blocos de imagens. (a) Bloco Catanduva; (b) Bloco Ribeirão Pires; (c) Bloco SP-270.



5. EXPERIMENTOS E ANÁLISES

Os blocos de imagens foram fototriangulados considerando algumas abordagens de processamento, em função dos modelos com parâmetros adicionais descritos na Seção 3, usando o software LPS (versão 9.1). Nos testes realizados, os blocos foram processados diversas vezes, com os distintos modelos apresentados, procurando-se explorar a influência destes modelos sobre os resultados de fototriangulação.

Os experimentos realizados com as diferentes abordagens propostas foram:

A - Parâmetros de calibração originais (Tabela 2) e sem considerar parâmetros adicionais;

*B - Parâmetros de calibração originais e modelo de **Bauer** (3 parâmetros);*

*C - Parâmetros de calibração originais e modelo de **Jacobsen** (4 parâmetros);*

*D - Parâmetros de calibração originais e modelo de **Ebner** (12 parâmetros);*

*E - Parâmetros de calibração originais e modelo de **Brown** (14 parâmetros);*

*F - Parâmetros de distorção das lentes (k_1 , k_2) inicializados com valor zero e aplicando o modelo **Lens distortion** (2 parâmetros), sem pré-correção da distorção radial simétrica.*

A câmara Hasselblad foi previamente calibrada (em Março de 2007) no campo de calibração da FCT-UNESP de Presidente Prudente. O campo dispõe de 54 alvos, cujas coordenadas foram precisamente determinadas por procedimentos topográficos (precisão: $\sigma = 1\text{-}3\text{ mm} - 1\text{ sigma}$). Os parâmetros de calibração,

determinados por Bazan et al. (2007) utilizando o aplicativo científico CC desenvolvido na unidade, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 2 - Dados de calibração da câmara Hasselblad (Março/2007).

$f (mm)$	$50,1705 \pm 0,0051$
$x_0 (mm)$	$-0,0816 \pm 0,0030$
$y_0 (mm)$	$-0,7294 \pm 0,0021$
$k_1 (mm^{-2})$	$-2,8480 \times 10^{-05} \pm 0,6909 \times 10^{-07}$
$k_2 (mm^{-4})$	$1,3186 \times 10^{-08} \pm 0,4029 \times 10^{-09}$

Em todos os experimentos foram usados os parâmetros de OI determinados na calibração terrestre (Tabela 2), de forma que as fotocoordenadas fossem pré-refinadas. Apenas no experimento F não foram considerados os parâmetros de distorção das lentes previamente conhecidos.

Os pontos de enlace foram medidos automaticamente no software LPS com precisão subpixel (estimada na ordem de 1/3 do pixel), com controle de qualidade posterior. Os resultados dos diferentes experimentos propostos estão apresentados nas Tabelas 3 e 4. A Tabela 3 traz o Erro Médio Quadrático (EMQ) dos resíduos das observações e a variância da observação de peso unitária a posteriori, ($\hat{\sigma}_0^2$), todos expressos em pixels.

Na Tabela 4 são apresentados os valores do EMQ nos pontos de apoio e de verificação, assim como as precisões esperadas (σ_e) no cálculo das coordenadas tridimensionais. Estas precisões foram estimadas em função do erro esperado nas observações (1 pixel – 9 μm) e das características de coleta das imagens, definidas pela relação entre a aerobase e a altura de voo (Ver Tabela 1). Maiores detalhes podem ser obtidos em Kraus (1993). Esta precisão predita serve apenas como uma referência de valor que deverá ser obtida, no caso de reconstrução tridimensional de pontos, levando-se em conta apenas a geometria de coleta e o erro observacional para imagens verticais e um modelo isolado. Em algumas tabelas e gráficos mostrados os valores são apresentados em fração do GSD (*Ground Sample Distance* - elemento de resolução ou tamanho do pixel no terreno), para facilitar a comparação e análise dos resultados.

Tabela 3 - EMQ dos resíduos das observações e a variância da observação de peso unitário ($\hat{\sigma}_0^2$) para os experimentos realizados. Valores expressos em GSD.

	CATANDUVA			SP-270			RIB. PIRES		
	EMQ x	EMQ y	$\hat{\sigma}_0^2$	EMQ x	EMQ y	$\hat{\sigma}_0^2$	EMQ x	EMQ y	$\hat{\sigma}_0^2$
A	0,33	0,36	0,49	0,15	0,30	0,37	0,16	0,26	0,36
B	0,30	0,33	0,45	0,15	0,28	0,36	0,16	0,26	0,34
C	0,30	0,33	0,45	0,15	0,28	0,36	0,16	0,26	0,34
D	0,31	0,34	0,46	0,15	0,28	0,36	0,16	0,26	0,35
E	0,28	0,31	0,42	0,14	0,26	0,33	0,15	0,25	0,33
F	0,28	0,30	0,41	0,14	0,25	0,32	0,15	0,25	0,32

Tabela 4 - EMQ nos pontos de apoio (PA) e verificação (PV), e as precisões esperadas (σ_e) para os experimentos realizados.

		CATANDUVA			SP-270			RIB. PIRES		
		EMQ (PA)	EMQ (PV)	σ_e	EMQ (PA)	EMQ (PV)	σ_e	EMQ (PA)	EMQ (PV)	σ_e
A	X (m)	0,26	0,36	0,40	0,19	0,20	0,20	0,25	0,37	0,20
	Y (m)	0,23	0,47	0,40	0,21	0,33	0,20	0,24	0,41	0,20
	Z (m)	0,14	1,91	1,36	0,09	0,75	0,68	0,09	0,61	0,68
B	X (m)	0,26	0,33	0,40	0,19	0,21	0,20	0,23	0,33	0,20
	Y (m)	0,23	0,46	0,40	0,21	0,32	0,20	0,23	0,44	0,20
	Z (m)	0,10	0,97	1,36	0,09	0,48	0,68	0,08	0,45	0,68
C	X (m)	0,26	0,33	0,40	0,19	0,212	0,20	0,23	0,33	0,20
	Y (m)	0,23	0,46	0,40	0,21	0,323	0,20	0,23	0,44	0,20
	Z (m)	0,10	0,97	1,36	0,09	0,475	0,68	0,08	0,45	0,68
D	X (m)	0,26	0,32	0,40	0,18	0,211	0,20	0,24	0,34	0,20
	Y (m)	0,22	0,47	0,40	0,21	0,309	0,20	0,23	0,45	0,20
	Z (m)	0,10	1,03	1,36	0,09	0,567	0,68	0,08	0,45	0,68
E	X (m)	0,25	0,32	0,40	0,18	0,22	0,20	0,24	0,34	0,20
	Y (m)	0,22	0,46	0,40	0,21	0,31	0,20	0,23	0,47	0,20
	Z (m)	0,10	0,74	1,36	0,08	0,42	0,68	0,09	0,38	0,68
F	X (m)	0,26	0,34	0,40	0,18	0,19	0,20	0,23	0,37	0,20
	Y (m)	0,23	0,50	0,40	0,21	0,29	0,20	0,23	0,41	0,20
	Z (m)	0,08	0,51	1,36	0,09	0,35	0,68	0,07	0,37	0,68

As Figuras 3 e 4 apresentam os valores dos Erros Médios Quadráticos (EMQ) nas componentes planimétricas (Figura 3) e altimétrica (Figura 4) nos pontos de verificação, sintetizando os resultados mostrados na Tabela 3. Os valores são apresentados em relação ao GSD (*Ground Sample Distance* - elemento de resolução ou tamanho do pixel no terreno) da imagem, para facilitar a comparação e análise dos resultados.

Figura 3 - Resumos dos testes com os diversos grupos de parâmetros adicionais: EMQ da resultante planimétrica nos pontos de verificação para as abordagens definidas.

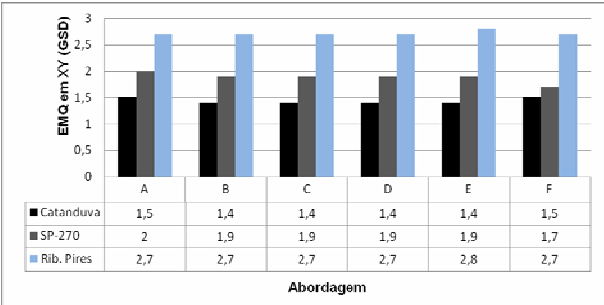
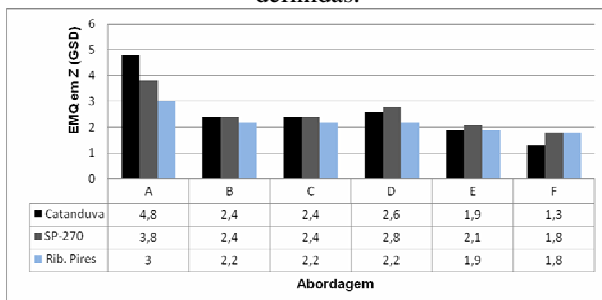


Figura 4 - Resumos dos testes com os diversos grupos de parâmetros adicionais: EMQ da componente altimétrica nos pontos de verificação para as abordagens definidas.



Observando a Figura 3 pode-se notar que o uso de parâmetros adicionais na fototriangulação (abordagens B, C, D, E e F) não resultou em melhoria significativa na planimetria, quando comparado com a abordagem A, na qual foram usados os parâmetros determinados em uma calibração prévia.

Com os resultados apresentados na Figura 4 verifica-se que a introdução de parâmetros adicionais, que modelam erros sistemáticos residuais, reduziu significativamente o erro na componente altimétrica. Esta melhoria de acurácia em Z é percebida em todos os blocos de imagens analisados. Isto está em conformidade com resultados de pesquisas realizadas com modelos de FPA em câmaras digitais de grande formato (KORNUS et al, 2006; GRUBER e LADSTADTER, 2006).

Verificou-se que o bloco de Catanduva foi o que apresentou o maior ganho de acurácia altimétrica no espaço objeto, principalmente quando considerada a abordagem F (Modelo de Lentes). Embora as razões base/altura dos blocos sejam equivalentes, neste caso o erro em altimetria foi cerca de 3,5 vezes menor, quando comparado aos resultados obtidos na abordagem A, na qual não foram considerados parâmetros adicionais. O bloco de Catanduva foi coletado com uma altura de vôo maior em relação aos demais blocos (Ver Tabela 1) e, como o LPS não possui recurso de correção da refração fotogramétrica, este bloco sofre maior influência deste efeito (Resultados da Abordagem A). Desta forma, com a introdução de parâmetros adicionais, o efeito da refração pode ser absorvido pelos parâmetros de distorção das lentes recalculados, tendo em vista que estes erros proporcionam efeitos similares na imagem.

Nota-se pelos resultados apresentados na Tabela 4, que os valores obtidos com a introdução dos modelos de Bauer e Jacobsen no processo de fototriangulação foram praticamente os mesmos, com pequenas variações na ordem do milímetro. O parâmetro adicional do modelo de Jacobsen (a_4), em relação ao modelo de Bauer, não contribuiu para melhorar a acurácia do processo. Este parâmetro corresponde a um coeficiente para a modelagem de segunda ordem da deformação do sensor em relação ao eixo y. Contudo, como se trata de uma câmara digital, na qual o sensor de

coleta é plano e de estado sólido, os valores obtidos para este parâmetro nos testes foram praticamente nulos, como esperado.

Os resultados obtidos com o modelo de Brown com 14 parâmetros foram melhores que os obtidos com os modelos de Bauer e Jacobsen, que são definidos por poucos parâmetros. Já o modelo de Ebner não apresentou resultados substancialmente diferentes dos modelos de Bauer e Jacobsen.

O modelo de distorção das lentes (*Lens Distortion*) foi o modelo de FPA que possibilitou os melhores resultados. Com isto, verificou-se que apenas os dois parâmetros de distorção óptica foram suficientes para absorver os erros residuais do processo, possibilitando melhores resultados que os demais modelos testados. Jacobsen (2003) e Fraser (1982) destacam que a utilização de modelos com grande número de parâmetros pode trazer problemas de correlação entre as variáveis e uma superparametrização que não necessariamente melhoram os resultados.

De modo similar, Murai et al. (1984) verificaram, por meio de experimentos de calibração terrestre com parâmetros adicionais, que modelos físicos como o de Brown e modelos que descrevem a distorção das lentes, mostraram melhor acurácia que modelos polinomiais, tais como os de Ebner e Grün (modelo não considerado neste trabalho). Para o caso de câmaras digitais, os grupos de parâmetros adicionais podem ser simplificados, uma vez que os sensores CCD (ou CMOS) são planos e não apresentam deformações temporais (JACOBSEN, 2003).

Cabe destacar ainda que, quando se calibra uma câmara, as condições de pressão e temperatura do laboratório, ou do campo de teste, geralmente são diferentes das condições climáticas no momento do voo. Este fato pode alterar os valores dos parâmetros de calibração previamente calculados e, conseqüentemente, prejudicar a qualidade na determinação de coordenadas de pontos no espaço objeto, como discutido por Jacobsen e Wegmann (2002). Jacobsen (2003) relata que os efeitos de distorção das lentes e de deformação afim apresentam-se mais estáveis, o que não pode ser garantido para os valores da distância focal e da posição do ponto principal, quando expostos à variações climáticas e movimentos excessivos.

Deste modo, a introdução de parâmetros adicionais ao processo de fototriangulação (ajuste em bloco) pode absorver estas variações residuais dos parâmetros de orientação interior e melhorar a acurácia dos pontos no espaço objeto, fundamentalmente na coordenada Z, conforme verificado nos testes realizados.

Diante do exposto, é relevante verificar a variação dos parâmetros de calibração em relação às condições climáticas, para os blocos de imagens considerados neste trabalho. A Tabela 5 apresenta os parâmetros de distorção radial simétrica das lentes (k_1 , k_2) calculados no processo de fototriangulação com o modelo de lentes (*Lens Distortion*), juntamente com os valores das temperaturas médias. As medidas de temperatura para os blocos de imagens foram obtidas a partir de dados meteorológicos consultados no sítio do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), levando-se em conta as datas e os horários dos vãos realizados. Como os dados referem-se às estações meteorológicas terrestres, os valores de temperatura foram propagados para as altitudes dos vãos realizados (Ver

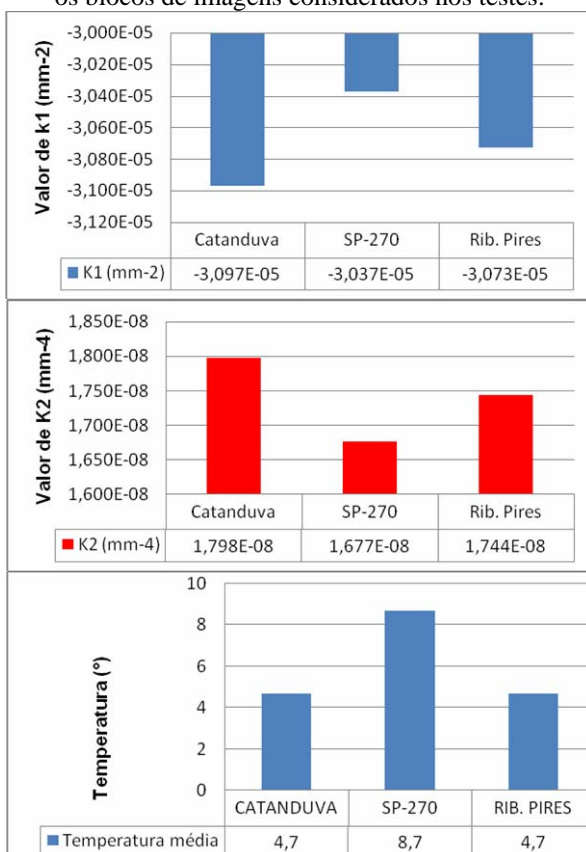
Tabela 1), considerando os valores de referência de atmosfera padrão, conforme apresentado em Sapucci (2001).

Tabela 5 - Parâmetros da distorção radial simétrica das lentes (k_1 , k_2) e dados de temperatura para os blocos de imagens considerados nos testes.

Bloco	Parâmetros		Temperatura média (°C)
	k_1 (mm ⁻²)	k_2 (mm ⁻⁴)	
<i>Catanduva</i>	$-3,097 \cdot 10^{-5}$	$1,798 \cdot 10^{-8}$	4,7
<i>SP-270</i>	$-3,037 \cdot 10^{-5}$	$1,677 \cdot 10^{-8}$	8,7
<i>Rib. Pires IA</i>	$-3,073 \cdot 10^{-5}$	$1,744 \cdot 10^{-8}$	4,7

Para melhor caracterizar os dados apresentados na Tabela 5, a Figuras 5 expõe graficamente os valores dos parâmetros de distorção óptica e de temperatura para os blocos de imagens considerados nos testes.

Figura 5 - Parâmetros de distorção óptica (k_1 , k_2) e dados de temperatura (°C) para os blocos de imagens considerados nos testes.



Com os dados apresentados, numericamente na Tabela 9 e graficamente na Figura 5, verifica-se claramente que há correlação entre os parâmetros de distorção das lentes e as variações de temperatura do ambiente de coleta, sendo esta correlação da ordem de 75% entre a temperatura e k_1 e da ordem de -74% entre k_2 e a temperatura. Contudo, como nos procedimentos de fototriangulação com parâmetros adicionais utilizados, a distância focal não foi estimada o modelo de lentes pode ter absorvido, em parte, o efeito de eventuais mudanças no valor da distância focal, decorrente pode sofrer em virtude das variações nas condições ambientais, principalmente da temperatura. Como foi mostrado há significativa variação da temperatura entre o momento da aquisição das imagens do campo de teste e a operação em vô, para cada bloco, e a distorção das lentes não deveria ser afetada significativamente por estas variações.

Além disso, a correção da refração atmosférica não foi realizada, visto que o LPS não dispõe de ferramenta de pré-correção deste erro sistemático. Como o efeito da refração na imagem é similar ao efeito da distorção óptica, os parâmetros calculados pelos modelos de FPA podem também ter absorvido o efeito da refração atmosférica.

De qualquer modo, constatou-se que a variação de temperatura entre os ambientes de calibração e de vô pode interferir nos valores dos parâmetros de orientação interior da câmara. Conforme apresentado nos resultados deste trabalho, o uso de parâmetros adicionais pode minimizar parte deste efeito, uma vez que os parâmetros são recalculados nas condições de coleta das imagens, absorvendo tanto as mudanças nos parâmetros de orientação interior quanto os efeitos da refração atmosférica. Para evitar estes efeitos induzidos por variações de temperatura, alguns sistemas de aquisição de imagens mais modernos recorrem à dispositivos de estabilização térmica.

6. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho se mostraram compatíveis com aqueles obtidos por Kornus et al (2006) e Gruber e Ladstadter (2006) em testes realizados com câmaras digitais de grande formato, a partir dos quais verificou-se que o uso de parâmetros adicionais no processo de fototriangulação é recomendado para qualquer tipo de câmara em projetos nos quais se deseja alta precisão, fundamentalmente na componente altimétrica.

Verificou-se que para a câmara usada o modelo de parâmetros adicionais que considera somente os parâmetros de distorção das lentes possibilitou melhores resultados que os demais modelos analisados. Os parâmetros de distorção das lentes proporcionaram uma melhoria na acurácia em Z em torno de duas a três vezes.

Por fim, destacou-se, pela análise dos parâmetros de distorção calculados no experimento F (Modelo *Lens Distortion*), que houve alta correlação (em torno de 75%) entre os parâmetros da distorção radial simétrica das lentes (k_1 , k_2) e as variações de temperatura no momento de coleta das fotos. Deste modo, percebe-se

que a variação de temperatura pode influenciar na orientação interior de sensores de coleta de imagens, sendo relevante recorrer à dispositivos de estabilização térmica e a modelagem com parâmetros adicionais para a atenuação deste efeito.

Futuros estudos agregando informação de georreferenciamento direto serão realizados, o que permitirá a determinação conjunta da distância focal e das coordenadas do ponto principal.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam externar os sinceros agradecimentos à empresa Engemap Engenharia, Mapeamento e Aerolevantamento Ltda. pela cessão dos dados que foram analisados neste trabalho, e à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio via programa PIPE (proc. 04/09217-3).

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, J. B.; OLIVAS, M. A. A. Calibração de câmaras aerofotogramétricas. *Boletim da Universidade Federal do Paraná*, Curitiba, n. 26, p. 1-40, 1981.
- BAZAN, W. S.; TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M. Calibração de um sistema dual de câmaras digitais convergentes. In: II Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 2007, Presidente Prudente. *Anais...* Presidente Prudente: Universidade Estadual Paulista, 2007. v. 1. p. 726-734.
- CLARKE, T. A.; FRYER, J. G. The development of camera calibration methods and models. *Photogrammetric Record*, USA, v. 16, Issue 91, p. 51-66, April 1998.
- CRAMER, M. Performance of medium format digital aerial sensor systems. In: XXth ISPRS Congress – Commission 5, 2004, Istambul-Turkey. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 2004*. Istambul: ISPRS, July 2004.
- DIGICAM. Germany: IGI-Systems, 2008. Informations, components and specifications about the IGI digital camera. Disponível em: < <http://www.igi-systems.com/products/digicam.htm>>. Acesso em: 03 Mar. 2008.
- FRYER, J. G. Camera Calibration. In: ATKINSON, K. B. *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*. Department of Photogrammetry and Surveying: University College London. Whittles Publishing, 1996, 371p.
- GRUBER, M.; LADSTADTER, R. Geometric issues of the digital large format aerial camera Ultracam_D. In: International Calibration and Orientation Workshop (EuroCOW), 2006, Castelldefels-Barcelona. *Proceedings of EuroCow 2006*. Castelldefels-Barcelona: ISPRS Commission I, 25-27 Enero 2006.
- HABIB, A. F.; MORGAN, M. F. Small format digital cameras for mapping applications: Calibration and Stability Analysis. *Série em Ciências Geodésicas*. Curitiba, v. 3, p. 3-25, Maio 2003.
- HABIB, A. F.; PULLIVELLI, A. M.; MORGAN, M. F. Quantitative measures for the evaluation of camera stability. In: XXth ISPRS Congress – Commission 1, 2004, Istambul-Turkey. *Proceedings of XXth ISPRS*. Istambul: ISPRS, July 2004.

- ILMB – Integrated land Management Bureau. *Small and Medium format digital camera specifications*. Canadian: British Columbia, March-2007, v. 0.11. Disponível em: <<http://ilmbwww.gov.bc.ca/bmgs/pba/trim/specs/#digitalcam>>. Acesso em: 27 jan. 2008.
- JACOBSEN, K. Issues and method for in-flight and on-orbit calibration. In: Workshop on Radiometric and Geometric Calibration, 2003, Gulfport. *Proceedings of Workshop on Radiometric and Geometric Calibration*, Gulfport, 2003.
- JACOBSEN, K.; WEGMANN, H. Dependencies and problems of direct sensor orientation. In: C. HEIPKE, K. JACOBSEN and H. WEGMANN (Eds.), *Integrated Sensor Orientation*, OEEPE Official Publication N°. 43 Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, Germany, pp. 73-84, 2002.
- KORNUS, W.; ALAMÚS, R.; TALAYA, J. Tests and performance analysis of the DMC at the Cartographic Institute of Catalonia (ICC). In: International Calibration and Orientation Workshop (EuroCOW) 2006, Castelldefels-Barcelona. *Proceedings of EuroCow 2006*. Castelldefels-Barcelona: ISPRS Commission I, 25-27 Enero, 2006.
- KRAUS, K. *Photogrammetry – Fundamentals and Standard Processes – Volume 1*. Bonn: Ferd. Dümmlers Verlag, 1993. 397p. (ISBN 3-427-78684-6).
- LEICA PHOTOGRAMMETRY SUITE PROJECT MANAGER, *Leica Geosystems Geospatial Imaging, LLC*. Copyright 2006, Norcross, GA 30092-2500, USA, 2006.
- LUGNANI, J. B. *Introdução a Fototriangulação*. Curitiba. Editora UFPR, 1987.
- MIKHAIL, E. M., BETHEL, J. S. MCGLONE, J. C. *Introduction to Modern Photogrammetry*. Copyright 2001. New York: John Wiley & Sons, 2001, 479p.
- MURAY, S.; MATSUOKA, R; OKUDA T. A study on Analytical Calibration for non Metric Camera and Accuracy of Three Dimensional Measurement. In: In: XVth ISPRS Congress – Comissão 5, 1984, Rio de Janeiro. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 1984*. Rio de Janeiro: ISPRS, 1984. Vol.25, Part V p. 570-579.
- RUY, R.; TOMMASELLI, A. G.; HASEGAWA, J. K.; GALO, M.; IMAI, N. N.; CAMARGO, P. de O. SA-API – A lightweight airborne image acquisition system: design and preliminary tests. In: 7th Geomatic Week, 2007, Barcelona. *Proceedings of 7th Geomatic Week*, Barcelona: Institut de Geomatica, February 2007.
- SAPUCCI, L. F. *Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS*. 2001. 193 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- WACKROW, R.; CHANDLER, J. H.; BRYAN, P. Geometric consistency and stability of consumer-grade digital cameras for accurate spatial measurement. *Photogrammetric Record*, USA, v. 22, Issue 118, p. 121-134, June 2007.

(Recebido em abril/08. Aceito em dezembro/08)